

基于 LoRa 技术的天基搜寻定位系统设计与实现

张琛¹, 余利君², 蔡濛¹, 张添铄¹

(1. 军事科学院, 北京 100000;

2. 海军军医大学第三附属医院, 上海 200000)

摘要: LoRa 技术在各类应急搜寻定位中广泛应用, 基于 LoRa 技术的应急搜寻定位系统主要依靠于陆基、空基与海基平台, 此类平台缺乏广域发现与快速响应能力, 不利于搜救人员第一时间掌握遇险人员的相关情况; 同时, 现有的卫星搜寻定位设备体积较大、功耗较高, 不适合于随身携带与长时间使用; 为了解决上述问题, 设计一种基于天基平台的应急搜寻定位系统, 采用 LoRa 与卫星技术, 研制新型天基信号转发器; 同时, 采用可视化技术与地理信息数据, 嵌入高精度传感器, 研制地面求救与搜救设备, 实现遇险人员搜寻定位; 实验结果表明, 该系统工作稳定可靠, 将搜寻幅宽提升至千公里级别, 具有一定的指导意义。

关键词: LoRa; 卫星平台; 搜寻定位; 传感器应用; 可视化救援; 系统设计

Design and Implementation of Space-Based Search-Positioning System Based on LoRa Technology

ZHANG Chen¹, YU Lijun², CAI Meng¹, ZHANG Tianshuo¹

(1. Academy of Military Sciences, Beijing 100000, China;

2. The Third Affiliated Hospital of Naval Medical University, Shanghai 200000, China)

Abstract: Currently, LoRa technology is widely used in emergency search-positioning systems, but the system based on the LoRa technology mainly relies on land-based, air-based and sea-based platforms. These platforms lack the ability to search sea widely and respond rapidly, and it is not convenient for rescue personnel to grasp the situation of distressed individuals in a timely manner. Meanwhile, existing satellite search-positioning equipment usually has the characteristics of large size and high power dissipation, which is not suitable for carry-on and prolonged usage. In order to solve the above problems, an emergency search-positioning system based on space-based platform is designed and implemented. The LORA technology is combined with satellite platform to develop a new space-based search-positioning payload. And then, visualization technology, geographic information data and high precision sensors are introduced to develop ground distress and search-rescue equipment, achieving rescue positioning for workers in distress. Experimental results show that the system is stable and reliable and has certain guiding significance with a search-positioning scope up to 1 000 km.

Keywords: LoRa; satellite platform; search-positioning; sensor application; visual rescue; system design

0 引言

近年来, 各类无线电通信技术取得迅猛发展, 主要包括蜂窝网络 (3G/4G/5G)、WiFi、蓝牙、ZigBee 以及低功率广域网络 (LPWAN, low-power wide-area network) 等。其中, LoRa (LoRa, long range) 作为 LPWAN 中相对成熟的技术之一, 其利用 433 MHz/470 MHz/868 MHz

/915 MHz 等非授权频段实现了超低功耗、超远距离传输, 还可以将数万个分布在不同地域的传感器组织成一个无线局域网, 具有网络节点多、覆盖范围大等特点^[1]。正因如此, LoRa 技术在火灾救援、抗震救灾以及海上定位等各类应急搜救领域中获得广泛的应用^[2-8]。目前, 基于 LoRa 技术的搜寻定位系统主要依靠于陆基、空基与海基平台, 与天基平台相比, 此类平台能够

收稿日期:2023-12-21; 修回日期:2024-04-26。

作者简介:张琛(1990-),男,大学本科。

通讯作者:余利君(1997-),女,大学本科。

引用格式:张琛,余利君,蔡濛,等.基于 LoRa 技术的天基搜寻定位系统设计与实现[J].计算机测量与控制,2025,33(3):243-249,258.

覆盖的搜寻范围十分有限（最大为百公里级别），处置各类应急情况的响应速度也比较慢，不利于搜救人员第一时间掌握遇险人员的相关情况。此外，相比于现有的卫星搜救体系采用的无线电通信技术^[9-10]，LoRa 调制核心思想是使用这种频率的变化的模式来调制基带信号，Chirp 变化的速率也就是所谓的“Chirpness”，我们称为扩频因子（SpreadFactor）。扩频因子越大，传输的距离越远，代价就是数据速率降低。因为要用更长的码片（Subchirp）来表示一个码元（Symbol），而一个码元代表的信息量只有几或者十几比特。比如 SF7（扩频因子为 7 的情况）就有 128 种不同的码片，每个码元共由 128 个码片组成，不过只能承载 7 b 的信息量；如果采用 SF10，则有 1 024 种不同的码片，每个码元共由 1 024 个码片组成，能承载 10 b 的信息量。LoRa 技术更加适合于长距离发送、小数据量且使用电池供电的求救设备^[11]。

为了解决上述问题，本文提出一种基于天基平台的应急搜寻定位系统，将 LoRa 技术与卫星平台相结合，研制新型天基信号转发器，以期能够大幅提高基于 LoRa 技术的搜寻定位系统广域发现与快速响应的能力。同时，系统引入可视化技术与地理信息数据，综合分析天基平台接收到的各类求救信号，为搜救人员展开合理高效的营救提供辅助决策支撑。

1 系统架构设计

基于 LoRa 技术的天基搜寻定位系统架构如图 1 所示，系统由天基信号转发器、地面求救设备以及地面搜救设备 3 部分组成。天基信号转发器负责接收地面求救设备发射的求救信号，完成求救报文的数据协议解析，并将求救报文转发至地面搜救终端。同时，天基信号转发器还需与卫星星务单元进行数据交互，严格执行各项遥控命令，确保卫星平台安全有序的运行。地面求救设备利用北斗导航模块获取遇险人员的定位信息，根据卫星轨道情况，将定位信息及时发送至天基信号转发器。地面搜救设备由一个可运行于 Windows 操作系统的平板电脑与一个外置的无线信号通信单元（下文简称“通信单元”）构成。其中，通信单元负责接收天基信号转发器转发的搜救报文，并通过 USB 接口将搜救报文传输至平板电脑。平板电脑负责解析搜救报文，利用空间索引技术、瓦片缓存技术以及空间分析技术将遇险人员的周边情况通过液晶显示屏进行可视化展示，为搜救人员提供辅助决策信息。特别说明的是，在该系统中，3 个部分全部采用 LoRa 无线通信技术实现远距离数据交互。

2 系统硬件设计

系统各部分均采用 SX1278 芯片及其外围电路构建

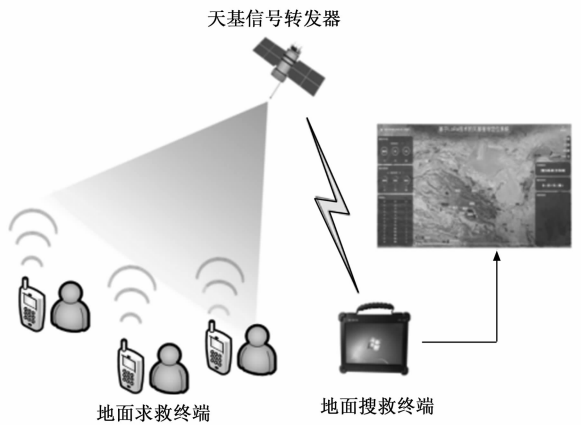


图 1 基于 LoRa 技术的天基搜寻定位系统总体架构

LoRa 无线通信链路^[12]，具体硬件设计框图如图 2 所示。其中，天基信号转发器以 Microchip 公司的 SmartFusion2 系列现场可编程逻辑门阵列（Field Programmable Gate Array, FPGA）作为主控制器，SmartFusion2 基于 Flash 架构，采用第四代 65 nm 工艺，安全性好，可靠性高，低功耗，同时，具备一定的抗单粒子效应能力。供电部分采用 TLV62130 完成由 12 V 至 1.2 V 与 3.3 V 的电平转换。同时，载荷分别采用 PCA9511 与 DS90LV047 构建星务 IIC 接口链路及数传 LVDS 接口链路。

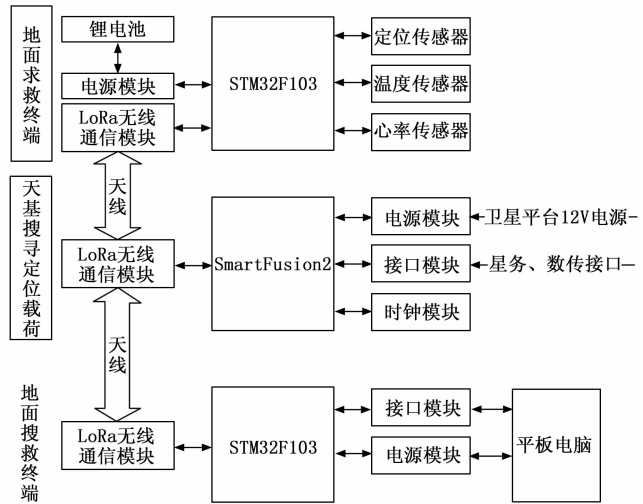


图 2 系统硬件设计框图

地面求救设备与通信单元均以 STM32F103 微处理器为主控制器，供电部分采用 TLV62130 完成由 5 V 至 3.3 V 的电平转换。同时，地面求救设备采用定位传感器、温度传感器以及心率传感器采集遇险人员的相关信息。此外，通信单元采用 FT232RL 接口芯片完成串口到 USB 接口的转换，实现与平板电脑的数据交互。

2.1 LoRa 无线通信模块

系统采用 SX1278 芯片构建 LoRa 无线通信模块。

该芯片具备 LoRa 扩展频谱调制解调技术^[13], 是一种低功耗、超长距离的半双工收发器, 具有低至 11.5 mA 的接收电流以及 200 nA 寄存器保持电流。同时, 其内部包含了射频功能和逻辑控制功能的集成电路, 内部集成压控振荡器、锁相环电路、功率放大电路、低噪声放大电路、调制解调电路、变频器、中放电路等, 高集成度极大简化了硬件设计, 具体电路如图 3 所示。

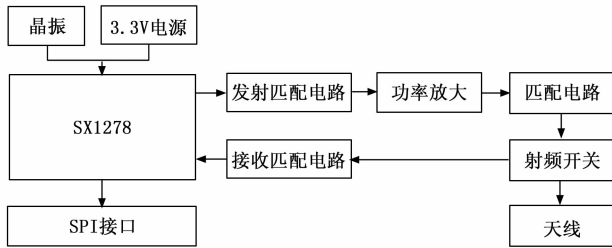


图 3 LoRa 无线通信模块电路

从图 3 可以看出, 为了增加信号发射功率, 满足星地链路预算要求, 增加了一级功率放大器, 确保最大发射功率 P 大于等于 30 dBm。

本系统采用的通信频点 f 为 433 MHz, 扩频因子 SF 为 10, 通信带宽 BW 为 125 kHz, 编码率为 0.8, 码速率为 976 bps。此类信道参数与工作模式均可由主控制器可通过 SPI 总线控制 SX1278 的内部寄存器来实现。

2.2 天线设计

为了确保星地通信链路的稳定可靠, 系统必须具备一定的链路电平预算余量。其中, 信号的自由空间损耗 L 可以表示为:

$$L = 32.4 + 20 \times \lg(D * f) \quad (1)$$

式中, D 为通信距离 (单位 km), f 为通信频率 (单位 MHz)。

本系统拟应用于 500 km 轨道高的卫星平台, 在星地仰角为 15° 时, 通信距离 D 为 1 695 km, 通信频点 f 为 433 MHz, 可估算出星地间信号的自由空间损耗约为 149.75 dB。

查阅 SX1278 的设计手册可知, LoRa 无线通信模块的接收灵敏度 S 可以表示为:

$$S = (7 - SF) \times 2.5 - (\log_2 \frac{500}{BW}) \times 3 - 118.5 \quad (2)$$

式中, SF 为扩频因子, BW 为信道带宽 (单位 kHz)。

在 BW 为 125 kHz, SF 为 10, 有式 (2) 估算出 SX1278 的接收灵敏度为 -132 dBm。

系统链路预算余量 M 可以表示为:

$$M = P + G_t - L + G_r - L_r - L_p - L_o - S \quad (3)$$

式中, P 为发射功率 (单位 dBm), G_t 为发射天线增益 (单位 dBi); L 为自由空间损耗 (单位 dB); G_r 为接收

天线增益 (单位 dBi); L_r 为馈线损耗 (单位 dB); L_p 为极化损失 (单位 dB); L_o 为其他损失 (单位 dB)。其中, 按照经验值, 可令 L_r 为 0.5 dB, L_p 为 3 dB, L_o 为 0.5 dB, L_o 为 3 dB。按照 LoRa 无线通信模块设计方案, 卫星和求救设备发射功率为 30 dBm。

由式 (3) 可知, 在发射功率与接收灵敏度一定的情况下, 去除 3 dB 的链路裕量, 接收和发射天线的总增益大于等于 -2.25 dBi 即可满足设计要求。对于地面设备, 可采用传统成熟的棒状全向天线即可获得 -2 dBi 增益。对于卫星平台而言, 其天线设计必须符合各项航天标准, 通过振动、热真空、电磁兼容等测试项目。在本系统中, 天基信号转发器采用左旋圆极化的平板天线, 增益设计指标为 $\pm 65^\circ$ 范围内优于 0 dBi。同时, 星上和地面设备使用的天线均满足阻抗 50Ω 以及驻波比小于 1.5。

2.3 传感器模块

地面求救设备包含定位传感器模块、温度传感器模块以及心率传感器模块。

其中, 定位传感器采用 EVA-M8M-0, 其兼容北斗、GPS 以及 GLONASS 等卫星导航定位系统, 具有 -164 dBm 接收灵敏度、28 秒定位时间以及低功耗等优异特性。同时, 主处理器可以通过串口发送模块配置命令, 接收模块返回的定位信息。

温度测量部分采用 DS18B20 单线数字温度传感器, 仅需要一个 GPIO 接口即可实现与主控制器的双向通讯, 具有较小的体积封装。该温度传感器的测量范围为 $-55 \sim +125^\circ\text{C}$, 在 $-10 \sim +85^\circ\text{C}$ 范围内, 测量精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

光电测量法是目前性价比最高、商用最成熟的心率测量方案。将一束光打在皮肤上并收集反射/透射光, 由于血液对特定波长光有吸收作用, 因此随着心跳带动血液流速周期性变化, 接收端可以获得有规律的光强信号, 从而实现心率测量。系统采用的是型号为 WTHRM122 的心率测量传感器, 该芯片采用超小 $2 \times 2 \times 0.9 \text{ mm}$ 封装, 工作温度在 -40°C 到 $+85^\circ\text{C}$ 之间, 具备很强的抗冲击、回流和温度性能, 内置心率采集算法, 准确率可高达 95%。

3 系统软件设计

3.1 天基信号转发器程序设计

由于天基信号转发器采用 FPGA 作为其主控制器, 因此, 其内部程序可以分为测控子程序、数传子程序以及通信子程序。其中, 测控子程序主要通过 IIC 接口接收由卫星星务单元分发的地面控制指令, 同时, 将载荷当前的各项参数指标按照规定的协议传输至卫星星务单元。数传子程序主要通过 LVDS 接口将载荷接收

到的各类求救报文传输至卫星数传单元，为载荷与卫星平台构建一个高速数据传输链路。通信子程序主要通过 SPI 接口控制 LoRa 通信模块，实现求救信号的接收与转发，各部分程序的执行流程如图 4 所示。

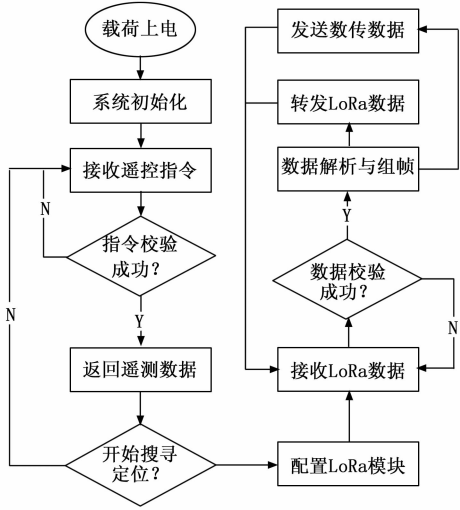


图 4 天基信号转发器软件流程

3.2 地面求救设备程序设计

地面求救设备程序负责控制定位传感器模块、温度传感器模块以及心率传感器模块，实现位置坐标、周边温度以及遇险人员心率数据的定时更新。同时，对其内部的 LoRa 模块进行控制，利用外部中断机制检测触发信号。当检测到外部触发信号后，将设备的各类传感器最新采样数据通过 LoRa 模块发射至天基信号转发器，程序的具体执行流程如 5 图所示。

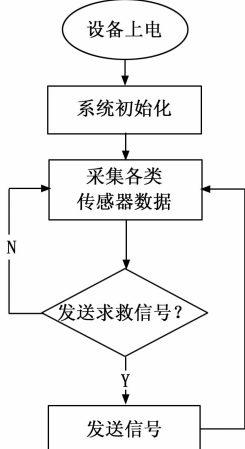


图 5 地面求救设备软件流程

在传输过程中，数据通常以一定的帧格式进行封装，本系统采用的传输帧格式如图 6 所示。

其中，校验采用 CRC-16 标准，参与计算的参数不包含帧头和 CRC 校验值。

名称	帧头	设备序列号	定位传感器	温度传感器	心率传感器	预留传感器	预留传感器	系统时间	CRC 校验
字节数	2	2	8	1	1	4	4	7	2

图 6 传输帧格式

3.3 地面搜救设备程序设计

地面搜救设备的程序分为两部分，一部分是通信单元的程序，另一部分是基于 Windows 架构（平板电脑）的搜救可视化软件。其中，通信单元的程序流程比较简单，首先主控制器 STM32F103 通过 SPI 接口控制 LoRa 模块，接收天基信号转发器转发的报文。其次，主控制器 STM32F103 将该报文通过 UART 接口传输至平板电脑。

平板电脑部分的搜救可视化软件主要采用面向服务的应用程序开发方法进行设计，遵循 SOA 体系标准、业务规范、数据资源等标准体系，利用地理信息系统空间分析方法，再结合地图服务，实现可视化的搜救决策辅助功能。该软件主要包括实时信息获取、数据可视化、救援决策等 3 个功能模块，具体功能如图 7 所示。

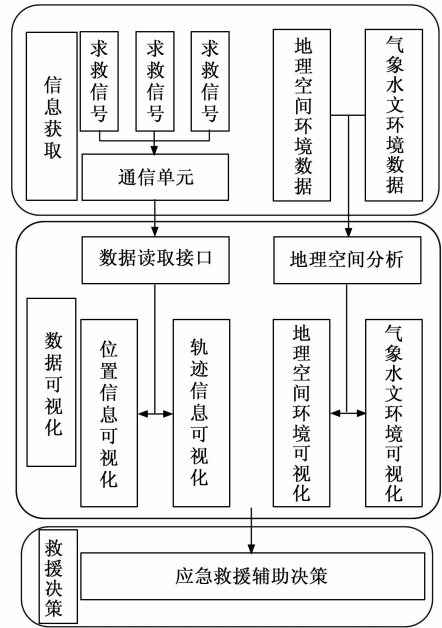


图 7 搜救可视化软件功能模块

3.3.1 信息获取

软件通过串口函数与通信单元进行数据交互，获取各类求救信息。同时，针对地理空间和气象水文等环境数据，开发相应的矢量数据、栅格数据读取、分析功能模块，实现对地理空间数据和气象水文数据的存储和管理。

3.3.2 数据可视化

数据可视化是软件的核心功能模块，针对位置数

据、轨迹数据和环境数据的各自特点, 开发相应的数据可视化功能, 将 3 类数据展示在统一框架之下, 为后续的搜救辅助决策提供数据支撑。

1) 地理空间和气象水文等环境数据可视化。地理空间和气象水文等环境数据是搜救过程的空间基础和环境基础。通过研制地图样式配置、研发地图样式配置、弹窗内容自定义配置、历史数据动态回溯、关联数据查询、二三维一体化展示等功能子函数, 实现地理空间和气象水文等环境数据的二三维一体化显示。

2) 传感器数据可视化。对于读取遇险人员位置数据, 经过时间转换、投影转换、异常值剔除等数据处理, 形成与地理空间数据空间基础相一致的可靠位置信息, 显示在地理空间数据和气象水文环境数据之上。同时, 结合温度传感器与心率传感器数据, 使搜救人员及时掌握搜救目标所在位置、周边地理环境、气象水文以及自身生理状态等情况, 为开展下一步精准搜救提供信息保障。

3) 轨迹数据可视化。为了进一步掌握遇险人员的历史轨迹, 研发目标轨迹数据可视化功能子函数, 对轨迹数据进行统一时空基准处理, 同样叠加在地理空间数据和气象水文环境数据之上, 使搜救人员把握遇险人员的运行轨迹, 分析其发展变化, 可为制定更加科学精准及时搜救提供技术支撑。

3.3.3 救援决策

综合考虑事故地点位置、事故程度、地理环境及气象水文环境等信息, 结合采集到的遇险人员生理参数与遇险地点周边具备的搜救力量, 基于地理信息系统的空间分析技术, 进行搜救人员与目标位置的路径规划, 优化救援器械、救援物质、以及急救措施等方案, 为开展科学、精准、快速应急救援提供辅助决策支撑。

4 测试与实验

系统软件、硬件设计完成之后, 搭建测试与实验平台用于验证系统的有效性。为了简化验证过程, 测试实验平台由一个天基信号转发器、一个地面求救设备以及一个地面搜救设备构成。通过链路仿真验证系统无线通信的可行性, 依据仿真计算结果构建仿真测试场景, 以仿真试验的方式验证系统的单机的功能和性能, 从而验证系统的可行性。

4.1 单机性能指标测试

主要测试天基信号转发器的发射功率与接收灵敏度、地面求救设备的发射功率以及地面救援设备的接收灵敏度, 这些指标是保证整个系统正常运行的基础。

天基信号转发器和地面求救设备发射功率测试框图如图 8 所示。

由于天基信号转发器和地面求救设备发射的信号过

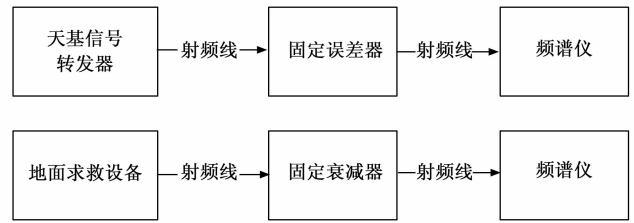


图 8 发射功率测试框图

强无法直接接入到频谱仪, 需要通过一个固定衰减器对信号进行衰减方可接入到频谱仪, 设备的发射功率为频谱仪检测到的信号强度加上线损和衰减值, 测试结果如表 1 所示。

表 1 测试结果

项目	频谱仪检测值/dBm	衰减值/dB	线损/dB	发射功率/dBm
天基信号转发器	10.5	20	0.5	31
求救设备	10	20	0.5	30.5

结果显示, 天基信号转发器和地面求救设备发射功率达到设计要求, 能够满足系统要求。

天基信号转发器和地面救援设备接收灵敏度测试框图如图 9 所示。

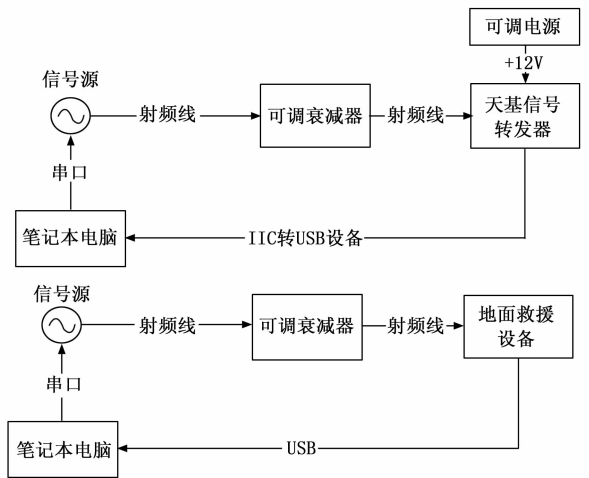


图 9 接收灵敏度测试框图

天基信号转发器和地面救援设备的接收灵敏度测试需要通过一个可调衰减器对信号源信号进行衰减使其进入天基信号转发器和地面救援设备的信号强度小于等于 -132 dBm, 连续发送 1 000 包数据确保其收包率大于等于 90%, 测试结果如表 2 所示。

表 2 测试结果

项目	信号发射强度/dBm	衰减值/dB	线损/dB	收包率/%	接收灵敏度/dBm
天基信号转发器	-47.4	85	0.5	95	-133.9
地面救援设备	-47.4	85	0.5	93	-133.9

通过对天基信号转发器和地面救援设备接收灵敏度测试，验证其接收灵敏度符合设计要求。

考虑到星地设备在接收信号时受相对速度影响会产生实时变化的多普勒频偏，通过对 500 km 卫星轨道的多普勒频偏和多普勒变化率进行分析，可计算出该轨道下多普勒频偏范围 -12~+12 kHz，且频偏变化率为 300 Hz/s。为了完成该项测试，需要通过混频器将矢量信号源产生的以 300 Hz/s 多普勒变化率从 -12~+12 kHz 多普勒信号耦合到 LORA 调制信号中，其测试框图如图 10 所示。

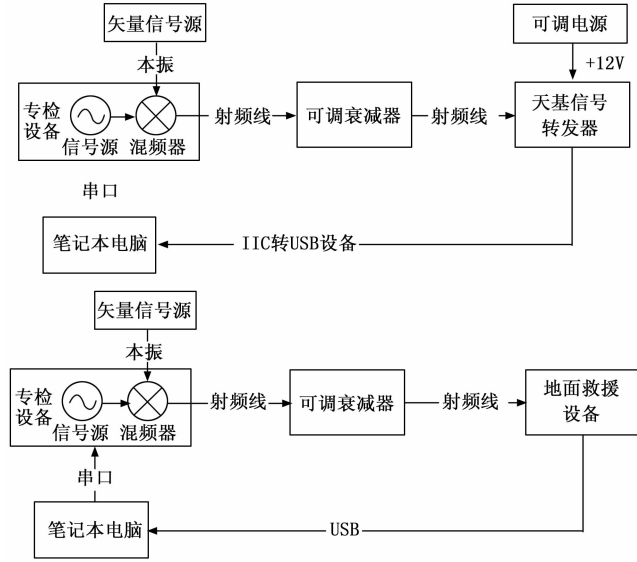


图 10 多普勒频偏多普勒变化率测试框

天基信号转发器和地面救援设备的多普勒频偏和多普勒变化率测试需要将经过多普勒混频后的信号接入到可调衰减器进行衰减，使其进入天基信号转发器和地面救援设备的信号强度小于等于 -132 dBm，连续发送 1 000 包数据确保其收包率大于等于 90%，测试结果如表 3 所示。

表 3 测试结果

项目	混频后信号强度/dBm	衰减值/dB	线损/dB	多普勒频偏/MHz	频偏变化率/Hz/s	收包率/%
天基信号转发器	-53.2	79	0.5	432.988~433.012	300	92
地面救援设备	-53.2	79	0.5	432.988~433.012	300	91

通过对天基信号转发器和地面救援设备多普勒频偏和多普勒变化率测试，在 -12~+12 KHz 多普勒频偏范围内以 300 Hz/s 多普勒变化率的 LORA 信号能够被天基信号转发器和地面救援设备解调，符合实际应用场景。

4.2 天线指标测试

本系统中，地面求救/搜救设备采用成熟的棒状天线，其性能指标不再进行测试。

为了配合天基信号转发器收发无线电信号，新研制了左旋圆极化的平板天线，因此，需要对其性能指标进行测试。方向图测试结果表明，±65°范围内天线的增益优于 0 dBi，达到了系统要求。同时，实测重量小于 450 g，阻抗与驻波比为 1.4，也达满足设计指标，如图 11 所示。

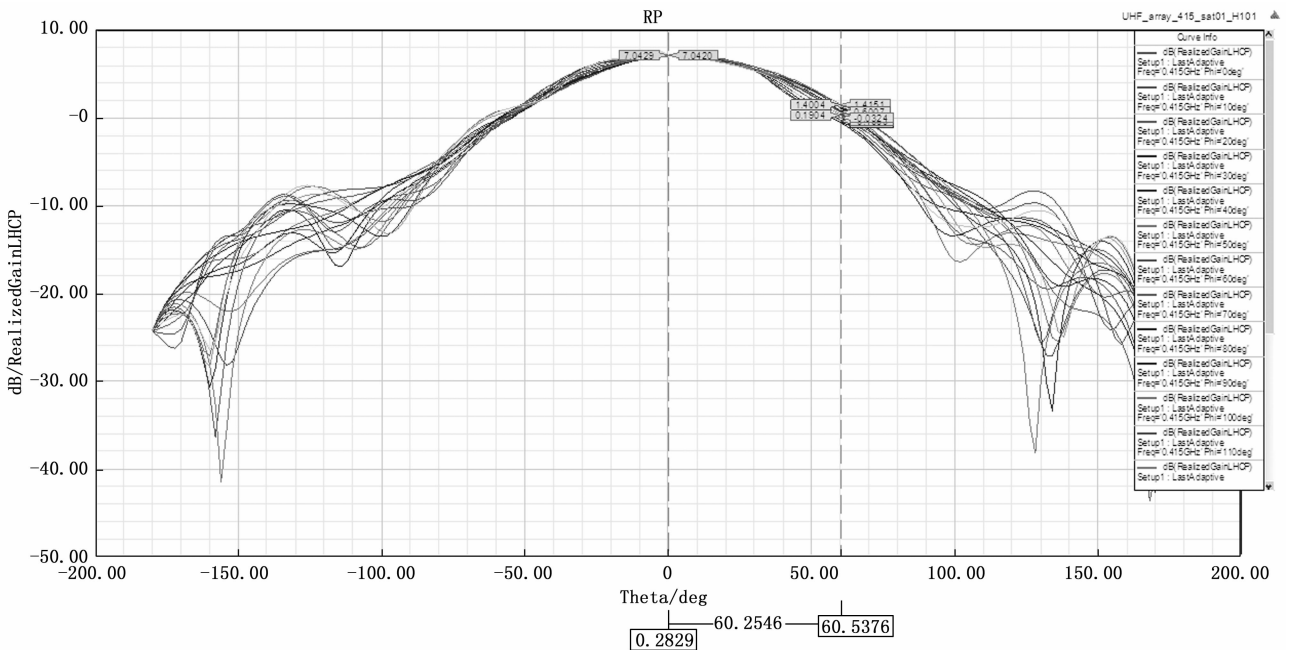


图 11 左旋圆极化的平板天线方向图

因此, 根据单机测试结果, 结合式 (1) ~ (3) 可知, 系统在 $\pm 65^\circ$ 范围内的星地通信链路电平余量 M 大于 3.75 dB, 符合大于 3 dB 的基本通信链路余量要求, 能够确保天基搜寻定位系统的通信质量稳定可靠。同时, 根据 15° 仰角可推算, 搜寻定位的幅宽大于 1 000 km, 远大于现有平台的搜寻范围。

4.3 系统联合测试

在各个单机与天线性能参数达标的基础上, 通过联合测试, 验证系统功能的完备性。系统测试分为功能测试和性能测试, 其功能测试为测试各个单机功能和接口逻辑, 性能测试为测试各个单机间无线通信能力包括接收灵敏度、多普勒频偏测试和多普勒变化率测试。

为了简化功能测试环境, 单机之间通过有线信道进行互联。第一步, 利用一台计算机模拟卫星星务单元, 通过 IIC 接口向天基信号转发器发送相应的控制指令, 使其进入搜寻定位工作模式, 同时, 计算机接收天基信号转发器发送的遥测数据, 并对其正确性进行验证; 第二步, 手动控制地面求救设备, 使其发射求救报文; 第三步, 利用计算机接收天基信号转发器发送数传数据, 并对其正确性进行验证; 第四步, 利用地面搜救设备接收并显示天基信号转发器转发的求救信息。测试结果显示, 天基信号转发器能够正常接收与转发地面求救设备发射的求救报文, IIC 接口与 LVDS 接口工作正常。同时, 地面搜救设备能够正确显示遇险人员的相关信息, 为救援人员提供可视化数据, 如图 12 所示。

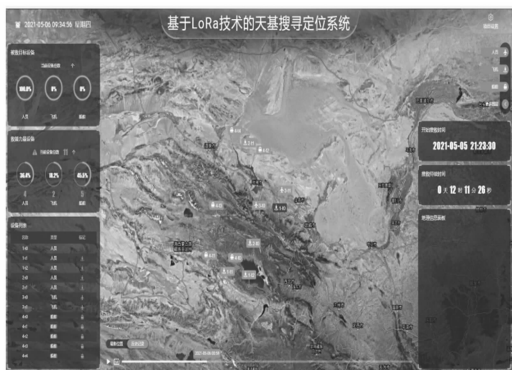


图 12 可视化搜救信息

性能测试为了模拟天基信号转发器入轨后, 星地设备间的通信情况, 结合式 (1) ~ (3) 可计算出需要调节的衰减值, 地面求救设备通过混频器将多普勒信号与 LORA 信号耦合在一起通过衰减器衰减后以无线的方式发送给天基信号转发器, 天基信号转发器收到信号后通过转发信道将信号转发, 地面救援设备的天线接收到转发信号后, 通过混频器将多普勒信号与 LORA 信号耦合在一起, 经过衰减器衰减后被地面救援设备解调并在可视化软件上显示。

试验中, 地面求救设备连续发送了 1 000 包数据, 地面救援设备的收包率达到 92%, 测试结果如表 4 所示。

表 4 测试结果

项目	混频后信号强度	衰减/值 dB	线损/dB	多普勒频偏/MHz	频偏变化/率 Hz/s	收包率
地面求救设备	-53.1 dBm	15	0.5	432.988~433.012	300	—
天基信号转发器	—	—	0.5	432.988~433.012	300	92%
地面救援设备	-23.1 dBm	79	0.5	432.988~433.012	300	92%

通过地面求救设备发送带多普勒频偏的 LORA 信号, 经由天基信号转发器将接收到的信号转发给地面救援设备, 地面救援设备也能够接收带有多普勒频偏的信号, 从而验证在星地间设备能够正常通信, 符合设计需求。

5 结束语

本文所设计的基于 LoRa 技术的天基搜寻定位系统, 通过构建天基搜寻定位平台, 解决了搜寻定位技术对传统平台的依赖, 实现了基于 LoRa 技术的星地信息交互, 提高了新型搜寻定位系统广域发现与快速响应的能力。同时, 系统利用多种高精度的传感器, 准确采集遇险人员相关信息, 结合地理信息系统, 采用可视化技术对搜救过程提供辅助决策, 提高救援效率。实际测试结果表明, 该系统通信链路余量高, 信息交互实时性强, 可视化效果明显, 搜寻定位幅宽大于 1 000 km, 具有很强的实用参考价值。

参考文献:

- [1] 胡佳佳, 李志斌, 韩 祥, 等. 基于 LoRa 通信的空冷凝汽器监测系统设计与实现 [J]. 仪表技术与传感器, 2020, (9): 81 - 84.
- [2] 刘 硕, 彭 博, 李 吉, 等. 基于北斗和 LoRa 的胸带式搜救系统设计与实现 [J]. 医疗卫生装备, 2020, 41 (12): 35 - 39.
- [3] 吴雅琴, 师兰兰. 基于 LoRa 的火灾救援现场人员定位算法研究 [J]. 计算机应用与软件, 2020, 37 (6): 70 - 75.
- [4] 刘 颖, 鹿玉红, 刘 敏, 等. 基于 LoRa 无线技术的地震应急救援坍塌信息获取 [J]. 计算机仿真, 2020, (3): 224 - 228.
- [5] 曾 凤, 肖天庭, 任建新, 等. 基于 LoRa 的海上航行安全及应急救援系统设计 [J]. 现代电子技术, 2019, 42 (24): 121 - 124.
- [6] 齐 斌, 胡 兵, 王小娟. 基于 LoRa 和 GPRS 的无线火灾报警系统设计 [J]. 消防科学与技术, 2021, 40 (2): 242 - 245.

(下转第 258 页)